

ICS 13.020.40

CCS Z 00

团体标准

T/CSER 0××—2023

地下水污染可渗透性反应墙风险管控 效果评估技术指南

Technical guideline for evaluating the effectiveness of risk control of permeable reaction
walls for groundwater pollution

（征求意见稿）

2023-××-××发布

2023-××-××实施

中关村众信土壤修复产业技术创新联盟发布

目 次

目次 I

前言 II

1. 范围 1

2. 规范性引用文件 1

3. 术语和定义 2

4. 基本原则和工作程序 2

5. 更新地块概念模型 4

6. 效果评估的对象、范围和时间节点 4

7. 效果评估方案设计要求 4

8. 采样与检测要求 6

9. 风险管控效果评估 6

10. 效果评估报告 7

11. 后期管理监管 7

附录 A PRB 填料性能评估方法 8

附录 B PRB 水力性能评估数值模拟方法 10

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

本标准由中关村众信土壤修复产业技术创新联盟提出并归口管理。

本标准起草单位：南方科技大学、生态环境部环境规划院、深圳市南科环保科技有限公司、成都理工大学、北京化工大学、中国水电基础局有限公司、浙江久核地质生态环境规划设计有限公司、江苏光质检测科技有限公司。

地下水污染可渗透性反应墙风险管控效果评估技术指南

1. 范围

本标准规定了可渗透性反应墙地下水污染风险管控效果评估的原则、内容、程序和技术要求。

本文件适用于采用可渗透性反应墙技术实施地下水污染风险管控工程的效果评估。

本标准不适用于放射性污染、致病性生物污染地下水治理的效果评估。

2. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件仅该日期对应版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB50021 岩土工程勘察规范

GB/T 36197 土壤质量土壤采样技术指南

HJ/T 20 工业固体废物采样制样技术规范

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ/T 91 地表水环境质量监测技术规范

HJ 164 地下水环境监测技术规范

HJ 166 土壤环境监测技术规范

HJ/T 194 环境空气质量手工监测技术规范

HJ/T 298 危险废物鉴别技术规范

HJ/T 493 水质 样品的保存和管理技术规定

HJ 682 建设用地土壤污染风险管控和修复术语

SL196 水文调查规范

HJ1019 地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则

HJ/T164 地下水环境监测技术规范

HG/T 20715 工业污染场地竖向阻隔技术规范

DL/T 5148 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范

DL/T 5150 水工混凝土试验规程

环办土壤〔2022〕16号 地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）

3. 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准

3.1

可渗透反应墙 Permeable reactive barrier, PRB

在受污染地下水流经的途径上建造由反应介质组成的墙，通过反应介质的吸附、沉淀、氧化、还原和生物降解等作用去除地下水中的污染物。常见的 PRB 类型有连续型、漏斗—导水门型和注入式反应带型等。

3.2

反应介质 Reactive material

指填充在 PRB 中可通过吸附、沉淀、氧化、还原和生物降解等作用去除地下水中污染物的反应材料。

3.3

反应容量 Capacity of reactive material

指单位质量的反应介质能去除的污染物的量。

3.4

地下水污染羽 Groundwater contaminant plume

污染物随地下水移动从污染源向周边移动和扩散时所形成的污染区域。

3.5

地块概念模型 Conceptual site model

用文字、图、表等方式综合描述水文地质条件、污染源、污染物迁移途径、人体或生态受体接触污染介质的过程和接触方式等。

3.6

反应半衰期 Half life

污染物在反应介质中浓度减少一半所需要的时间。

3.7

截获区 Capture zone

指地下水形成稳定流场后，能够流经 PRB 的地下水区域。

3.8

水力截获性能 Hydraulic interception performance

指 PRB 捕获污染羽流性能。

4. 基本原则和工作程序

4.1 基本原则

针对地下水污染可渗透性反应墙风险管控效果的评估应对 PRB 建设是否满足工程设计要求、下游地下水是否达到风险管控目标、填料性能和地下水截获性能否满足长期管控要求等情况进行科学、系统地评估，提出后期环境监管建议，为地下水污染的风险管控和 PRB 的运行管理提供科学依据。

4.2 工作程序

地下水污染可渗透性反应墙风险管控效果评估的工作内容包括：更新地块概念模型、明确评估对象、范围和时间段、制定效果评估方案、现场采样与实验室检测、风险管控效果评估和效果评估报告编制。其工作程序如图 1 所示。

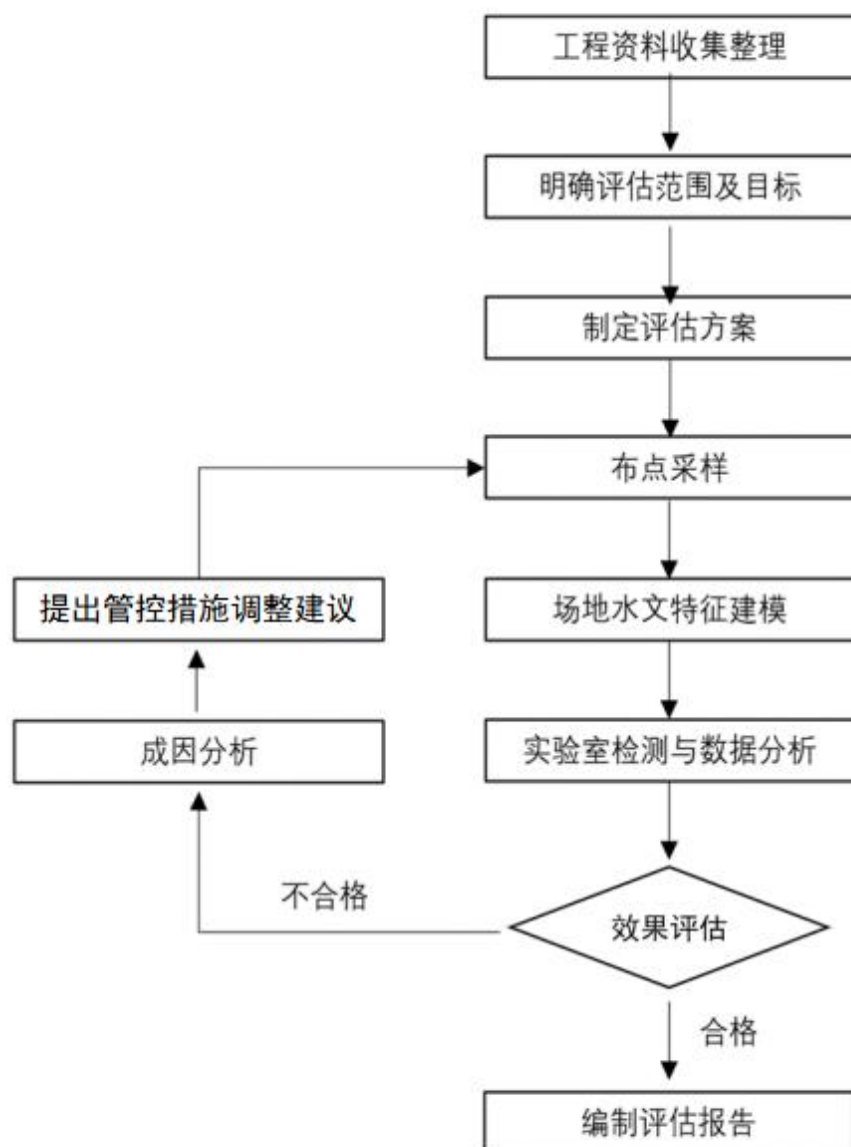


图 1 PRB 风险管控工程效果工作程序

5. 更新地块概念模型

在资料回顾、现场踏勘、人员访谈的基础上，掌握地块 PRB 工程情况，结合 PRB 工程实施前后地质与水文地质条件的变化情况、地下水流场、污染物空间分布、技术特点、工程设施布局等，对地块概念模型进行更新，完善地块 PRB 工程实施后的概念模型。

地块概念模型的更新按照 HJ 25.5 中第 5 节内容执行。

6. 效果评估的对象、范围和时间节点

6.1 效果评估的对象

效果评估的对象为风险管控区域 PRB 上下游的地下水、PRB 设施及其内部填料。评估的内容包括基础工程性能评估、污染物去除效果评估、水力截获性能评估和填料性能评估。

6.2 效果评估的范围

效果评估的范围应包括 PRB 地下水污染风险管控区域及其下游，以及工程可能涉及的二次污染区域。

6.3 效果评估的时间节点

6.3.1 效果评估工作开展应同时满足以下条件：

- a) 监理单位认定 PRB 工程达到设计方案要求；
- b) 地下水中污染物浓度稳定达标且地下水流场达到稳定状态时；
- c) 一般在工程设施完工 1 年内开展。

6.3.2 不相邻的 PRB 实施区域可按照工程进度分批次进行效果评估。

7. 效果评估方案设计要求

7.1 基础工程性能评估

7.1.1 基础工程性能的评估应在 PRB 工程施工完成后随即开展，评估方法包括资料收集分析、现场踏勘和试样测试等；

7.1.2 PRB 基础工程性能的评估的内容包括 PRB 类型、阻隔墙和反应墙的宽度、厚度、深度、展布方向、材料结构、透水性能或阻隔性能等。

7.1.3 PRB 结构部分参照 DL/T 5148 和 DL/T 5150 进行效果评估，阻隔墙部分参照 HG/T 20715 进行效果评估。

7.2 污染物去除效果评估

7.2.1 点位布设

7.2.1.1 地下水监测井应结合风险管控措施的布置，在 PRB 管控区域上游、内部、下游以及可能涉及的二次污染区域设置监测点。

7.2.1.2 上游地下水监测点应布设于管控区域的上游。

7.2.1.3 内部地下水监测点应布设于管控区域内，数量不少于 3 个，且应在 PRB 风险管控薄弱区域（如 PRB 设施平行两侧）加设地下水监测点。

7.2.1.4 PRB 下游地下水监测点应不少于 2 个，且每 100m 长度的 PRB，应设置不少于 1 个点监测点。对于 PRB 下游存在地下水出露为地表水的，可采用地表水监测代替，地表水监测点应分别布设于 PRB 段地表水的上游、中游和下游。

7.2.1.5 对于注入式反应带型 PRB，还应在反应带内部布设地下水监测点。

7.2.1.6 可充分利用地块环境调查、PRB 实施阶段设置的监测井，现有监测井应符合风险管控效果评估采样条件。

7.2.2 监测指标

7.2.2.1 地下水监测指标分为目标指标和辅助性指标，其中目标指标为管控的目标污染物，以判断污染物风险管控效果。辅助性指标为水化学指标包括 pH、氧化还原电位、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ，用于判断含水层性质变化。

7.2.2.2 。

7.2.3 采样频率

地下水点位的采样应至少每涉及化学氧化、化学还原、微生物降解的 PRB 工程的地下水检测指标应包括反应产生的二次污染物。原则上二次污染物指标应根据技术方案中的可行性分析结果和管控工程运行监测结果确定季度开展 1 次，两批次之间的间隔不少于 1 个月。对于地下水流场变化较快的，可适当提高采样频率。辅助性的水化学指标监测可每年开展一次。

7.3 水力截获性能评估

7.3.1 通过场地特征调查工作查看工程记录或者实地测量获取工程性能参数，至少包括反应墙的宽度、深度、厚度、漏斗段的阻隔性能、导水墙的渗透性能，并对是否存在优先通道情况进行分析、判断；

7.3.2 收集监测井水位信息，利用达西定律确定反应介质渗透系数 K 介质、周围含水层渗透系数 K_a 等绘制相应的地下水渗流图，包括地下水位随季节的变化和地下水流方向的变化，最终评估不同时间段的水力截获性能，具体评估方法详见附录 B。

7.3.2 水力截获性能应至少每季度开展 1 次评估。

7.4 填料性能评估

7.4.1 对于连续型和漏斗—导水门型 PRB，应采集其填料进行填料性能的评估，每 100m 的 PRB 活性反应区域应至少布设 1 个填料采样点，填料取样应尽量选择填料与含水层接触的上游界面。

7.4.2 PRB 填料的取样应至少每年开展一次，对于地下水污染物监测发现下游出现污染物连续超标的，应增加开展 PRB 填料的取样。填料性能评估的方法详见附录 A。

8. 采样与检测要求

8.1 样品采集

8.1.1 填料、地下水等样品采样过程涉及的采样方法、现场质量控制、采样工作的组织和现场人员防护等参照 HJ25.1 执行。具体样品的采集、保存与流转按照 HJ/T 164、HJ/T 166、HJ/T 91、HJ/T 493、HJ/T 194、HJ/T 20 和 HJ/T 298 执行。

8.1.2 地下水样品从预设的监测井内采集，采集参照 HJ 164 的相关要求执行。采样深度按照 HJ25.6 中第 9.2.1.1.4 款执行。

8.1.3 反应介质样品采集在导门段上方设置检查孔，取反应介质样品送实验室分析。采集方式为从检查孔钻探提取，参照 GB/T 36197-2018 的要求进行采样。

8.2 样品检测

8.2.1 地下水实验室检测参照 HJ25.2 执行。填料反应性能检测应优先选择国内外成熟实验方法。

8.2.2 野外平行样比例不少于样品总量的 10%，一般每批样品至少采集两组平行样。现场加标样比例不少于样品总量的 10%，每批样品至少有一组现场加标样。野外空白样每批样品至少有三个。

9. 风险管控效果评估

9.1 基础工程性能

若基础工程性能指标和达到风险管控方案设计的相关参数要求，则判断 PRB 工程性能指标合格，否则应对管控工程进行调整或重新评估管控工程的有效性。

9.2 污染物去除效果

9.2.1 对于污染物去除效果评估的评估，原则上要求 PRB 下游每口监测井中的检测指标均持续稳定达标，方可认为地下水风险管控效果达标。

9.2.2 对于未稳定达标的，可采用趋势分析进行风险管控效果判断：

a) PRB 下游地下水中污染物浓度呈现稳态或者下降趋势，可判断地下水达到风险管控效果。

b) PRB 下游地下水中污染物浓度呈现上升趋势，则判断地下水未达到风险管控效果。

9.2.3 在 95% 的置信水平下，趋势线斜率显著大于 0，说明地下水污染物浓度呈现上升趋势；若趋势线斜率显著小于 0，说明地下水污染物浓度呈现下降趋势；若趋势线斜率与 0 没有显著差异，说明地下水污染物浓度呈现稳态。趋势分析方法详见 HJ 25.6 的附录 D。

9.3 水力截获性能和填料性能

根据 PRB 运行之后的水力截获性能及填料性能变化，综合判断风险管控的长期效果。

10. 效果评估报告

效果评估报告应当全面真实地反应污染地块地下水 PRB 风险管控工程基础工程性能、污染物去除性能、水力截获性能、填料反应性能效果，按照效果评估的程序对地下水风险管控工程是否达到工程目标和污染物管控目标给出结论，并根据效果评估的结果，对该区域地下水长期监测和管控方案的优化提出建议。效果评估报告的格式参考已经发布的 HJ25.6 附录 E。

11. 后期管理监管

11.1 后期环境监管要求

11.1.1 对于实施地下水污染 PRB 风险管控的地块，应开展后期环境监管。

11.1.2 地下水污染 PRB 风险管控的后期监管内容包括设施运维、长期环境监测和制度控制。具体参考 HJ 25.6 执行。

11.2 设施运维

PRB 设施运维应制定长期运维方案，运维方案至少包括设施保护要求、PRB 填料性能监测、填料的更换和处置以及定期巡查等。其中填料性能监测的频率应根据效果评估预测的填料寿命和地下水监测结果综合考虑确定。

11.3 长期环境监测

11.3.1 地下水污染 PRB 风险管控需要在 PRB 下游的监测井实施长期环境监测。

11.3.2 监测井可采用原有效果评估的监测井。

11.3.3 长期监测应至少每年开展一次，并可根据实际情况进行调整。

附 录 A
(资料性)
PRB 填料性能评估方法

A.1 方法原理

按照从 PRB 现场的收集的填料使用配比和主要污染物的浓度范围，设置加速模拟柱相关参数。将采集的原水加速流过模拟柱，分析填料在地下水穿过时的处理性能变化，绘制污染物穿透曲线，评估 PRB 填料后续使用寿命。

A.2 加速模拟柱测试

A.2.1 加速模拟装置的组成包括柱式反应器、蠕动泵、进样水箱、出水水箱，具体组装示意如图 A.1 所示。柱体可选用玻璃、特氟龙和不锈钢等材料，柱体及管道材料不能与污染物发生反应。

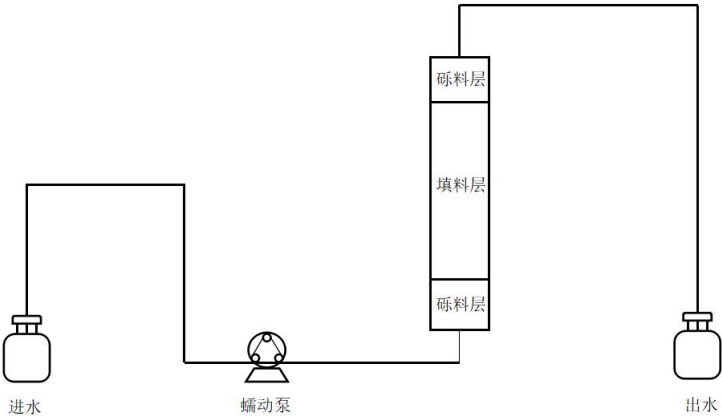


图 A.1 加速模拟装置示意图

A.2.2 原则上应采集现场实际的地下水和填料用于加速模拟柱测试，对于采集过程易导致水质变化的地下水，也可采用模拟污染地下水开展加速柱测试。

A.2.3 将填料按照现场实际配比和压实度填装至加速柱中，其水动力条件需根据地块水文地质特征设计相应流速、流量等参数。实验开始后利用蠕动泵从柱的下部注入污染地下水，从上部流出，根据实验要求设定流速。

A.2.4 实验开始后记录地下水流入量、流出量、侧壁取样孔及进出水口处的污染物浓度、Eh、pH 等指标。当出口污染物浓度大于风险管控标准时，停止实验。

A.3 填料性能评估

A.3.1 以污染物浓度 c 为纵坐标，模拟柱运行时间 t 为横坐标绘制曲线。当出水污染物浓度超过标准限值时，认为污染物穿透，PRB 对污染物失去处理性能，时间记为 t_b 。当出水污染物浓度等于进水污染物浓度

时,即 $c_t=c_0$, 认为 PRB 吸附饱和, 时间记为 t_s 。

A.3.2 运行两个模拟柱, 分别填入全新填料以及 PRB 场地中已使用的填料 (需记录已投入使用时间), 运行, 并记录穿透时间 t_{bn} 和 t_{br} 。则 PRB 填料预计剩余寿命计算如以下公式所示。

$$T = \frac{t_{bn}}{t_{br}} \times T_r - T_r \quad (\text{A.1})$$

式中:

T ——填料剩余使用寿命, a;

T_r ——填料投入使用时间, a;

t_{bn} ——全新填料的穿透时间, h;

t_{br} ——运行中 PRB 填料的穿透时间, h。

附 录 B

(资料性)

PRB 水力性能评估数值模拟方法

B.1 地下水数值模型构建

B.1.1 地下水数值模型的构建是 PRB 水力性能评估数值模拟的基础，其主要工作步骤包括模型设计、空间剖分、时间剖分、初始条件设置、边界条件设置、源汇项设置、模型参数设置、模型校准验证和敏感性分析。数值模型构建的具体操作见《地下水污染模拟预测评估工作指南》的 4.3。

B.1.2 除《地下水污染模拟预测评估工作指南》4.3.7 中提到的参数以外，PRB 效果评估数值模拟方法中需要增加与 PRB 材料有关的各项参数，包括 PRB 的结构参数（长度、宽度、高度等）、PRB 孔隙率、PRB 密度、PRB 活性介质处理污染物的反应常数等。

B.1.3 在《地下水污染模拟预测评估工作指南》的基础上，需要对孔隙度（ n ）、纵向弥散度（ DL ）、岩土容重（ ρ_b ）、吸附分配常数（ K_d ）、溶解相反应速率常数（ λ_1 ）和吸附相反应速率常数（ λ_2 ）等参数增加敏感度分析。

B.2 PRB 水力性能评估

B.2.1 根据地下水流及特定的现场特征，通过模型质点追踪模块确定 PRB 对场地地下水的捕获区，将模拟软件中捕获区输出文件导入 Arcgis 中，利用 Arcgis 几何计算功能计算捕获区面积 S_0 。具体步骤如下：

- a) 在已经创建完成的地下水模型中，增加质点追踪模块；
- b) 在模型质点追踪模块中赋值孔隙度；
- c) 利用质点追踪模块在模型的 PRB 部分创建追踪质点，形成一系列迹线。
- d) 打开迹线的方向箭头（指向为水流方向），在方向箭头处设置时间间隔。
- e) 打开 capture zones 捕获区部分自动填充捕获区（如图 1 所示）。
- f) 输出捕获区文件，导入 Arcgis 软件中，利用 Arcgis 几何计算功能计算捕获区面积 S_0 。

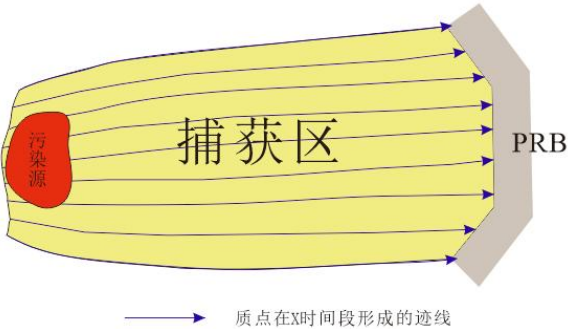


图 B.1 捕获区范围示意图

B.2.2 在 PRB 长期运行过程中，定期监测反应墙渗透系数等指标的变化，同时通过反应墙外和墙内地下

水水位变化校准模型。

B.2.3 根据 T 天后场地各项指标的变化,修订地下水流和溶质运移数值模型,按照 B.2.1 中步骤,重新计算 PRB 对场地地下水的捕获面积 ST。根据 T 时间段前后 PRB 对地下水捕获面积的变化,确定 PRB 的水力性能变化。

B.3 PRB 水力性能评估——污染物通量

B.3.1 在反应墙上游捕获区内设置地下水监测井,测定各监测点污染物浓度,通过插值法确定污染物浓度等值线分布图。

B.3.2 选取与地下水流动方向垂直且包含污染羽的整个宽度和深度的截面,估算该截面上污染物平均浓度 C_{ave} 。

$$C_{ave} = \frac{C_1 S_1 + C_2 S_2 + C_3 S_3 + \dots + C_n S_n}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n} \quad (B.1)$$

式中:

C_{ave} ——污染物平均浓度/(mg · L⁻¹);

S_1 、 S_2 、 S_3 、...、 S_n ——截面上离散为 n 个单元后每个单元的面积/m²;

C_1 、 C_2 、 C_3 、...、 C_n ——截面上离散为 n 个单元后每个单元的污染物浓度/(mg · L⁻¹)。

B.3.2 利用 ZONEBUDGET 模块计算单位时间内通过墙体的地下水体积,即墙体水流通量 Q_{flu} ;通过 C_{ave} 与 Q_{flu} 相乘得到污染物的通量 M。